بررسی کارایی طوقه‌های ال شکل در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل با استفاده از مدل آزمایشگاهی*

حسین خزیمه نژاد [۱] مهدی قمشی [۲] یوسف رمضانی [۳]

چکیده *آبشستگی پیرامون پایهٔ پل‌ها از مهم‌ترین مباحث در علم هیدرولیک به‌شمار می‌رود. وقوع آبشستگی موضعی در اطراف پایه و تکیه‌گاه پل‌ها یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها است. در زمینهٔ آبشستگی اطراف پل‌ها تمرکز تحقیقات بیشتر بر روی پایه بوده است تا تکیه‌گاه در حالی که بررسی آمار موجود بر روی شکست پل‌ها نشان می‌دهد که بیشتر مشکلات، مربوط به تکیه‌گاه است و بالطبع هزینه‌های بیشتری نیز در این بخش صرف شده است. یکی از روش‌های کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل، نصب طوقه بر روی آن است. طوقه‌ها بستر را در مقابل جریان‌های گردابی اطراف پایه محافظت می‌کنند. در تحقیق حاضر تأثیر دو نمونه طوقهٔ کامل و ال شکل در کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار گرفت و نموداری کاربردی در این زمینه استخراج و مشخص گردید که ابعاد طوقه بر عملکرد آن، تاثیر بسزایی دارد. نتایج نشان داد با افزایش ابعاد طوقه عملکرد آن بهبود می‌یابد. با مقایسهٔ دو نوع طوقه، مشخص شد، درصورتی‌که پیش‌آمدگی طوقه در طول، بیش از نیم برابر طول تکیه‌گاه باشد، طوقه‌های ال شکل مؤثرتر از طوقهٔ کامل عمل می‌کنند. طوقه‌های ال شکل به‌دلیل این‌که مانع حرکت رسوبات ناشی از فعالیت گرداب برخاستگی در پایین‌دست تکیه‌گاه نمی‌شوند، عملکرد بهتری از خود نشان دادند، از طرفی طوقه‌های ال شکل به‌دلیل مساحت کمتر درمقایسه با طوقه‌های کامل، در صورت کاربردی شدن از نظر اقتصادی نیز به صرفه‌تر خواهند بود.*

واژه‌های کلیدی طوقه‌ی ال شکل؛ تکیه‌گاه پل؛ آبشستگی موضعی.

Laboratory Investigation of Performance of L-shaped Collar on Reduction of Local Scour Around Bridge abutment

H. Khozeymehnezhad M. Ghomeshi Y. Ramezani

Abstract *Scour around bridge piers is one of the most important fields of hydraulic research. Local Scour around bridge piers and abutment is one of the main reasons of bridge failures. In the field of scour at the bridges, researches are more focus on scour of piers in compare with abutment. While the available information on the bridge failures required cost, the major problems are related to abutment. Therefore, most costs have spent in this part. One of the methods used to reduce of scour around bridge piers and abutment is installing collar. The collars protect the river bed against vortex flow in the vicinity of the piers and abutments . In this research the effect of two types of collar, include complete and L-shaped collar, were investigated on abutment scour reduction and application diagram is proposed. Results show that increasing dimensions of collars will increasing the efficiency of performance. Comparing of both collars indicated, that if the length of collars is larger than half the length of the abutment, the L-shaped collar is more effective in compare with complete collar. The L-shaped collar doesn't prevent sediment movement due to lift vortex in downstream of abutment and for this reason it is shown more effective performance than the complete collar. Also, using the L-shaped collars with less area is more cost effective.*

Keywords L-shaped Collar; Bridge Abutment; Local Scour.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۱/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۲۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

(۳) استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

اهمیت پل‌ها در برقراری راه‌های ارتباطی بر کسی پوشیده نیست. همه ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آبشستگی در اطراف پایه‌های آن‌ها تخریب می‌شوند و یا خسارت می‌بینند. تخریب پل‌ها علاوه بر خسارات مادی، در مواقع سیلابی، خسارت جانی و مسائل اجتماعی زیادی به‌دنبال دارد. حفاظت اطراف پایه‌های پل در مقابل آبشستگی می‌تواند از تخریب آن‌ها جلوگیری کند. از این‌رو، تحقیق روی این مسئله از اهمیت زیادی برخوردار است. شکل (۱) عوامل مختلف خرابی پل‌ها را که توسط سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور در سال ۱۳۹۱ گزارش شده است، نشان می‌دهد. سهم تخریب ناشی از آبشستگی در میان سایر عوامل تخریب پل‌های کشور برجسته‌تر می‌باشد [۱].

هم‌چنین مطابق مطالعات خادمی و همکاران [۲] در دهه‌ی ۸۰ تعداد زیادی از پل‌های رودخانه‌ای استان خوزستان دچار تخریب ناشی از آبشستگی شدند که باعث تحمیل هزینه‌های زیادی گردید. در شکل (۲) تصویر آبشستگی و تخریب ناشی از آن در محل یکی از پل‌های مذکور نشان داده شده است.

نتایج مطالعات انجام شده توسط ملویل [3] بر روی شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده نشان می‌دهد که در ۲۵ درصد آن‌ها تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب تکیه‌گاه، علت شکست پل بوده است. برطبق مطالعات ملویل [3]، از ۱۰۸ مورد شکست پل که در فاصلهٔ

سال‌های ۱۹٦۰-۱۹۸٤ در نیوزیلند رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل بود. ملویل هم‌چنین خاطر نشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌ها روی شکست پل در نیوزیلند ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است.

مکانیسم جریان در اطراف تکیه‌گاه‌ها

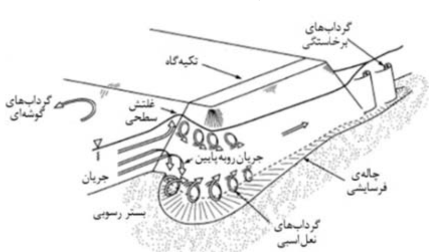
تحقیقات در زمینهٔ مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها توسط وانگ [4]، تی [5]، کوان [6]، کانداسمی [7]، دانگل [8] و بسیاری دیگر نشان داده است که مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به مکانیسم آبشستگی در پایهٔ پل‌ها است. جریان پایین‌رونده و گرداب اصلی در گوشهٔ بالادست تکیه‌گاه پل، همراه با گرداب ثانویه و گرداب برخاستگی در قسمت میانی و گوشهٔ انتهایی تکیه‌گاه پل باعث ایجاد فعل و انفعال پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها است. دیدن الگوی جریان اطراف تکیه‌گاه با استفاده از تکنیک‌های بصری جریان توسط دستگاه‌های جت رنگ، تزریق بلور رنگی، کاغذ شناور و تونل دود توسط بسیاری از محققان از جمله لیو [9] و ژیل [10] انجام شده است.



شکل ۱ عوامل مختلف خرابی پل‌ها مطابق گزارش سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور [۱]



شکل ۲ تخریب ناشی از آبشستگی در محل پل گلال کهنک [۲]



شکل ۳ میدان جریان پیرامون تکیه‌گاه پل

کاربرد طوقه به‌منظور کاهش آبشستگی

طوقه صفحه‌ای است که در ارتفاعات مختلف پایهٔ پل و معمولاً نزدیک بستر در اطراف پایه قرار می‌گیرد. این صفحهٔ محافظ به‌صورت یک سطح صاف و دارای ضخامت ناچیز می‌باشد و در کاهش توسعهٔ آبشستگی مؤثر می‌باشد. طوقه نباید خیلی ضخیم باشد، چرا که ضخامت زیاد طوقه سبب ایجاد مانع در برابر جریان می‌شود و آبشستگی را افزایش می‌دهد. یک طوقه که در هر سطحی نسبت به بستر نصب می‌شود، جریان را به دو ناحیهٔ بالا و پایین طوقه تقسیم می‌کند. ناحیهٔ بالای طوقه به‌عنوان یک مانع در مقابل جریان رو به پایین عمل می‌کند و قدرت جریان رو به پایین را در اثر برخورد با طوقه کاهش می‌دهد. در ناحیهٔ پایین طوقه، قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد. کارایی یک طوقه به اندازه و محل قرارگیری آن بر روی پایه نسبت به بستر، بستگی دارد. موقعی که طوقه برای محافظت از آبشستگی روی پایه نصب می‌شود، جریان رو به پایین در حین برخورد به طوقه از بستر منحرف می‌شود و جلوی آبشستگی گرفته می‌شود. اکثر تحقیقات انجام‌شده در زمینهٔ تأثیر طوقه بر کاهش یا کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل بوده است و در زمینهٔ تأثیر طوقه بر کاهش یا کنترل آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های پل مطالعات محدودی صورت گرفته است. در ادامه بخشی از تحقیقات انجام‌شده در خصوص تأثیر طوقه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار گرفته است.

چیو [11] تأثیر طوقه‌های محافظ را در کاهش آبشستگی پایهٔ پل مورد آزمایش قرار داد و با استفاده از طوقه به اندازه دو برابر قطر پایه، عمق آبشستگی به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت. هم‌چنین او اظهار داشت که طراحی و کاربرد درست طوقه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنگ‌چین در حل مشکلات آبشستگی موضعی پایه‌های پل باشد.

کومار و همکاران [12] با انجام آزمایش‌هایی تأثیر طوقه را بر کاهش آبشستگی بررسی کردند. ایشان از پایه‌هایی استوانه‌ای شکل با قطر ٦١ و ١١٢ میلی‌متر و پنج اندازهٔ مختلف با شکل دایره‌ای برای کاهش آبشستگی استفاده کردند. مطالعات نشان داد که هر چه طوقه بزرگ‌تر باشد تأثیر بیشتری بر کاهش خسارت آبشستگی خواهد داشت. آنان با استفاده از تحلیل آزمایش‌ها، معادلهٔ (۱) را برای محاسبهٔ میزان عمق آبشستگی ارائه کردند:

$$\frac{ds_p - ds_c}{ds_p} = 0.057\left(\frac{B}{d}\right)^{1.612}\left(\frac{H}{y_0}\right)^{0.837} \qquad (۱)$$

که در آن ds_c عمق آبشستگی پایهٔ طوقه‌دار، dsp عمق آبشستگی پایهٔ بدون طوقه، H فاصلهٔ سطح طوقه تا سطح آب، y0 عمق جریان، B قطر طوقه و b عرض پایه است.

سینگ و همکاران [13] نیز عملکرد طوقه‌ها را در کاهش آبشستگی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که چنان‌چه فاصلهٔ بین تراز بستر و تراز نصب طوقه افزایش یابد، حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. بهترین محل نصب طوقه در آزمایشات برابر D۰/۱D(D قطر پایه) زیر سطح بستر بود که در این حالت طوقه به پهنای دو برابر قطر پایه میزان آبشستگی را به میزان ۹۱ درصد کاهش داد. طوقه‌ها به ابعاد ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر قطر پایه با قرارگیری در سطح بستر به‌ترتیب ۵۰، ٦٨ و ۱۰۰ درصد میزان آبشستگی را در مقایسه با پایهٔ بدون طوقه کاهش دادند.

مونوکادا و همکاران [14] به مطالعهٔ عملکرد طوقه و شکاف در کاهش آبشستگی پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که استفاده از طوقه‌ای با عرض دو برابر قطر پایه می‌تواند آبشستگی را ۵۵ تا ۹٦ درصد کاهش دهد.

بلوچی و همکاران [۱۵] آزمایش‌هایی را به‌منظور بررسی اثر طوقه بر روند آبشستگی موضعی انجام دادند. طوقه‌های دایره‌ای مسطح به‌کار رفته عبارت بودند از: طوقه با دو و سه برابر قطر پایه و هم مرکز با پایه، و طوقه با سه برابر قطر پایه و هم مرکز با پایه و ناهم مرکز با پایه؛ نتایج نشان داد که وجود طوقه موجب تأخیر در زمان تعادل و کاهش عمق آبشستگی

می‌شود. طوقه با قطر دو و سه برابر قطر پایه روی بستر به‌ترتیب آبشستگی را ١٤/٥٨ و ٣٥ درصد کاهش داد.

زراتی و همکاران [16] تاثیر طوقه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های مستطیلی با سه نوع زاویهٔ قرارگیری پایه نسبت به جریان ۰، ۵ و ۱۰ درجه را ارزیابی کردند و دریافتند که هرچه طوقه عریض‌تر و ارتفاع آن نسبت به بستر کمتر باشد عملکرد بهتری خواهد داشت، هم‌چنین کارایی طوقه با افزایش زاویهٔ قرارگیری پایه نسبت به جریان کاهش می‌یابد.

در تحقیق دیگری زراتی و همکاران [17] عملکرد طوقه‌های مستقل و پیوسته همراه با سنگ‌چین را در گروه پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیبی از یک طوقهٔ پیوسته و سنگ‌چین منجر به کاهش عمق آبشستگی به میزان ۵۰ و ٦۰ درصد به-ترتیب در جلو و پشت پایه می‌شود. هم‌چنین عملکرد طوقه‌های مستقل بر روی هر پایه بهتر از عملکرد یک طوقهٔ پیوسته بر روی دو پایه بود. آنها مشاهده کردند که کارایی طوقه بر روی یک پایهٔ مستطیلی بیشتر از دو پایه در یک امتداد می‌باشد.

ثانی‌خانی و همکاران [۱۸] عملکرد طوقه‌های مربعی شکل را در کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد طوقه آبشستگی کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان داد که طوقه‌های مستطیلی در مقایسه با طوقه‌های دایره‌ای شکل، تاثیر بیشتری بر پراکنده‌سازی و تضعیف عملکرد گرداب‌های ایجاد شده در اطراف پایه داشتند. نتایج نشان داد که استفاده از طوقه در تراز زیر بستر نسبت به سایر ترازها تئثیر بیشتری دارد.

شریعتی و همکاران [۱۹] عملکرد طوقه با هندسه‌های متفاوت مربعی و دایره‌ای را در اطراف پایهٔ پل استوانه‌ای در ترازهای مختلف نسبت به تراز بستر مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. نتایج این تحقیق نیز حاکی از آن است که عملکرد طوقه‌های زیر سطحی نسبت به موقعیت‌های دیگر قرارگیری بهتر است.

در زمینهٔ تأثیر طوقه بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل‌ها تحقیقات محدودی صورت گرفته است که در ادامه به آن اشاره می‌گردد.

کایاترک [20] تأثیر طوقه بر توسعهٔ زمانی آبشستگی را در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها را مورد مطالعه قرار داد. نتایج وی نشان داد که طوقه، مانع فرسایش ذرات رسوبی توسط جریان پایین‌رونده می‌شود. کارایی طوقه برای جلوگیری از آبشستگی در بستر تابعی از اندازه و موقعیت قرارگیری آنها در اطراف تکیه‌گاه است. لی و همکاران [21] عملکرد طوقه را در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل در کانال مرکب بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که طوقه‌ها قادر به حفاظت تکیه‌گاه‌های پل از آبشستگی می‌باشند. آنها قادرند جریان برگشتی و گردابه‌های ثانویه را که مسبب آبشستگی می‌باشند، در اطراف بستر تکیه‌گاه کنترل کنند و بدین‌وسیله موجب کاهش آبشستگی شوند. خزیمه‌نژاد و همکاران [22] تأثیر ابعاد و موقعیت قراگیری طوقه را بر کاهش آبشستگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش ابعاد طوقه عملکرد آن بهبود می‌یابد، هم‌چنین با کاهش تراز نصب طوقه نسبت به بستر بر عملکرد آن افزوده می-شد. خزیمه‌نژاد و قمشی [23] عملکرد طوقه‌های متقارن و نامتقارن را بر کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل بررسی و مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که تأثیر عرض طوقه در بالادست بسیار مؤثرتر از دو بعد دیگر طوقه می‌باشد. عرض طوقه در پایین‌دست کمترین تأثیر را در کاهش آبشستگی در میان ابعاد هر دو نوع طوقه دارد. به همین جهت طوقهٔ نامتقارن هنگامی که عرض بالادست آن نسبت به پایین‌دست بزرگ‌تر باشد نسبت به طوقهٔ هم-مساحت خود عملکرد بهتری نشان می‌دهد. در حالت عکس، عمل‌کرد طوقهٔ متقارن بهتر خواهد بود.

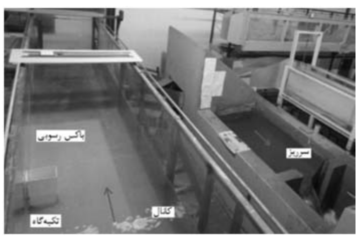
مطابق آنچه اشاره شد به‌دلیل مکانیزم متفاوت جریان پیرامون تکیه‌گاه پل، تأثیر هر کدام از ابعاد طوقه بر عملکرد آن در کاهش آبشستگی متفاوت است و از آن‌جایی‌که تاکنون تحقیقی بر روی عملکرد طوقه‌های ال‌شکل صورت نگرفته است، تحقیق حاضر با هدف

بررسی عملکرد طوقه‌های ال شکل در کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و مقایسهٔ آن با طوقهٔ کامل انجام گردید.

مواد و روش‌ها

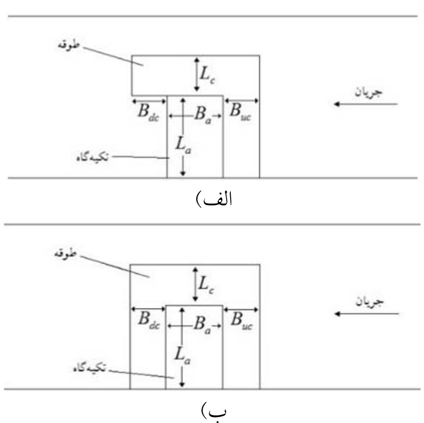
آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول ۹ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/٦ متر و شیب ثابت ۰/۰۰۰۳ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی‌گلاس و به ضخامت یک سانتی‌متر تشکیل شده‌اند. در فاصلهٔ ۲ متری از ابتدای فلوم یک باکس فلزی قرار گرفته است که طول، عرض و ارتفاع آن به‌ترتیب حدود ۲، ۰/۷ و ۰/۳ متر می‌باشد. این باکس از یک نمونه رسوب یکنواخت دارای انحراف معیار هندسی ۱/۲، چگالی ۲/٦۵ و قطر متوسط ۰/٧٦ میلی‌متر پر شده است به‌نحوی‌که پس از پرشدن در تراز بستر کانال قرار می‌گیرد. در خصوص اندازهٔ رسوبات در آزمایش‌های مربوط به پایه‌های پل، معیارهای متعددی ذکر شده است؛ به عنوان مثال طبق نظر رادکیوی [24] برای این‌که اندازهٔ رسوب تأثیری بر آبشستگی ایجاد نکند و از تشکیل فرم بستر نیز جلوگیری شود، بایستی قطر پایه به اندازهٔ رسوب، بیشتر از ۲۰ الی ۲۵ باشد. هر چند برای تکیه‌گاه شرایط تقریباً متفاوت است اما اندازهٔ رسوب در نظر گرفته شده با این معیار مطابقت دارد. در شکل (٤) تصویری از مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. آب از طریق پمپ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه پمپاژ می‌شودو به قسمت ابتدایی فلوم که بخش آرام‌کننده می‌باشد هدایت می‌گردد. در انتهای فلوم دریچهٔ کنترل برای تنظیم عمق در رقوم مورد نظر قرار دارد. سپس آب وارد حوضچهٔ آرامش می‌شود. در انتهای حوضچهٔ آرامش، سرریز مثلثی ۵۳ درجه‌ی استانداردی قرار دارد که دبی جریان توسط آن اندازه‌گیری می‌شود. پس از عبور از سرریز، آب مجدداً وارد مخزن زیرزمینی آزمایشگاه می‌شود و به این ترتیب یک جریان رفت و برگشتی در کل زمان آزمایش در فلوم برقرار می‌باشد

در این تحقیق از تکیه‌گاه مستطیلی به طول ۰/۲ و عرض ۰/۱۲ متر استفاده گردید. آزمایش‌ها در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و عمق ثابت ۰/۱۵ متر انجام گردید، از آن‌جایی‌که حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آستانهٔ حرکت رسوبات رخ می‌دهد یعنی V/V_c<1 که V سرعت متوسط جریان و V_c سرعت آستانهٔ حرکت ذرات رسوب می‌باشد، در دبی مذکور مقدار ۰/۹۵ برای پارامتر V/V_c در مقطع آزمایشی برقرار گردید.



شکل ٤ مدل آزمایشگاهی

طوقه‌های استفاده شده در این تحقیق از جنس پلکسی‌گلاس و به ضخامت ۳ میلی‌متر انتخاب شدند. طوقه‌ها از نظر شکل دارای دو وضعیت کامل و ال‌شکل می‌باشند. در شکل (۵) شماتیک ساده‌ای از طوقه‌های استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۵ شماتیک ساده‌ای از طوقه از نمای بالا
الف) طوقه‌ی ال ب) طوقه‌ی کامل

در شروع هر آزمایش ابتدا فلوم با نرخ کم جریان پر خواهد شد، این امر به این دلیل است که جلوی فرسایش ناشی از جریان ورقه‌ای در ابتدای آزمایش گرفته شود، سپس دبی آب به‌آرامی زیاد می‌شود تا به دبی مورد نظر برسد، پس از تنظیم دبی توسط سرریز مثلثی به وسیلهٔ دریچهٔ کنترل، آب در عمق مورد نظر یعنی ۰/۱۵ متر قرار می‌گیرد. سپس آزمایش به‌مدت زمان تعیین‌شده ادامه پیدا کرده و پس از اتمام آزمایش آب به‌آرامی از فلوم خارج می‌گردد. در انتها حداکثر عمق آبشستگی و الگوی رسوب‌گذاری ایجادشده در اطراف تکیه‌گاه به وسیله‌ی متر لیزری برداشت می‌گردد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر میزان آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مجهز به طوقه به شرح زیر است:

$$F(B, L_a, B_a, \varphi_1, L_c, B_{uc}, B_{dc}, Z_c, \varphi_2, d_S, y_s, y_{sc}, Q(V), g, y, \alpha, \rho, \rho_S - \rho, \mu) = 0 \quad (۲)$$

که در آن:

B عرض کانال، L_a طول تکیه‌گاه، B_a عرض تکیه‌گاه، ϕ_1 شکل تکیه‌گاه، L_c میزان پیش‌آمدگی طوقه در طول تکیه‌گاه، B_{uc} میزان پیش‌آمدگی طوقه در عرض در بالادست تکیه‌گاه، B_{dc} میزان پیش‌آمدگی طوقه در عرض در پایین‌دست تکیه‌گاه، Z_c فاصلهٔ عمودی طوقه نسبت به بستر ثابت، ϕ_2 شکل طوقه، d_s قطر رسوب، y_s و y_{sc} عمق آبشستگی به‌ترتیب با طوقه و بدون طوقه (با توجه به این‌که حداکثر عمق آبشستگی بدون حضور طوقه در گوشهٔ بالادست تکیه‌گاه اتفاق افتاد لذا همین نقطه برای برداشت عمق آبشستگی در هر دو حالت با طوقه و بدون طوقه به‌عنوان نقطهٔ مبنا در تمامی آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت.) ، Q یا V (دبی یا سرعت جریان)، g شتاب جاذبه، y عمق جریان، α زاویهٔ برخورد جریان با تکیه‌گاه، ρ جرم مخصوص آب، $(\rho_s - \rho)$ جرم مخصوص مستغرق ذرهٔ رسوب و μ ضریب لزوجت دینامیکی می‌باشند.

با به‌کار بردن تئوری باکینگهام رابطهٔ (۲) به رابطهٔ (۳) تبدیل خواهد شد.

$$Pr = f(L_c / L_a, B_{uc} / L_a, B_{dc} / L_a, Z_c / y, Fr, L_a / B, L_a / B_a, d_s / y, G_S\ Re, \alpha, \varphi_1, \varphi_2) \quad (۳)$$

که در آن:

Pr درصد کاهش عمق آبشستگی است که مقدار آن از رابطهٔ (٤) استخراج می‌گردد، *Fr* عدد فرود جریان، Gs چگالی ذرات رسوب و Re عدد رینولدز جریان می‌باشد و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

$$Pr = \frac{(y_S - y_{sc})}{y_s} \times 100 \quad (٤)$$

از میان پارامترهای بی‌بعد در رابطهٔ (۳)، B_{uc} / L_a، Z_c / y، Fr، L_a / B، L_a / B_a d_S / y، G_S، α، φ_1 و φ_2 ثابت در نظر گرفته شدند. هم‌چنین در تمامی آزمایش‌ها عدد رینولدز برای اطمینان از برقراری جریان متلاطم (Re>۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) پارامترهای بی‌بعد و مقادیرشان در تحقیق حاضر نشان داده شده است:

جدول ۱ پارامترهای بی‌بعد و مقادیر بررسی شده

پارامتر بی‌بعد	مقادیر بررسی شده
L_c / L_a	۰/۲۵، ۰/۳۷۵، ۰/۵، ۰/۷۵
B_{uc} / L_a	۰/۵
B_{dc} / L_a	۰، ۰/۲۵، ۰/۵

در جدول (۱) سه پارامتر بی‌بعد هم مربوط به طوقهٔ ال‌شکل و هم طوقهٔ کامل می‌باشد.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تحقیق حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرند. بخش اول مربوط به نتایج

آزمایش‌های شاهد است که بدون حضور طوقه انجام گردید. بخش دوم نتایج آزمایش‌های مربوط به طوقه‌های ال‌شکل، بخش سوم طوقه‌های کامل و در بخش چهارم نیز عملکرد دو نوع طوقه با هم‌دیگر مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

نتایج آزمایش‌های بدون حضور طوقه (آزمایش‌های شاهد)

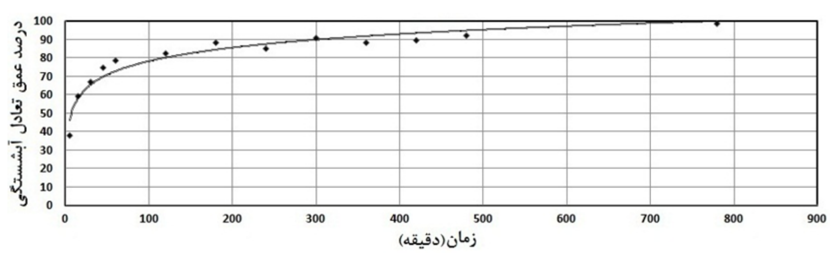
در این مرحله ابتدا یک آزمایش به‌مدت زمان ۱۳ ساعت انجام گردید. در طول مدت آزمایش در زمان‌های مختلف عمق آبشستگی در نقطهٔ مبنا برداشت گردید. در شکل (٦) تغییر عمق آبشستگی در مقابل زمان بدون حضور طوقه نشان داده شده است.

در شکل(٦) محور عمودی مربوط به درصد عمق تعادل آبشستگی می‌باشد. در تحقیق حاضر فرض بر این بود که ۹۹ درصد عمق تعادل آبشستگی (عمق نهایی آبشستگی) در مدت زمان ۱۳ ساعت اتفاق می‌افتد. در این صورت مطابق شکل(٦) حدود ۹۱ درصد عمق تعادل آبشستگی در مدت زمان ۵ ساعت اتفاق می‌افتد و با توجه به این‌که هدف در تحقیق حاضر، بررسی تأثیر ابعاد طوقه‌های ال‌شکل و کامل و مقایسهٔ عملکرد آنها می‌باشد و این هدف با مقایسهٔ نتایج آزمایش‌های مختلف فراهم می‌شود، لذا ۵ ساعت به‌عنوان زمان آزمایش برای تمامی آزمایش‌ها انتخاب گردید. بنابراین یک آزمایش شاهد دیگر در مدت زمان ۵ ساعت انجام و عمق آبشستگی در نقطهٔ مبنا برداشت گردید. الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش طبق آن‌چه که قبلاً گفته شد به‌وسیلهٔ متر لیزری برداشت شد. همان‌طور که قبلاً گفته شد حداکثر عمق آبشستگی در گوشهٔ بالادست تکیه‌گاه اتفاق افتاد. در شکل (۷) الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در آزمایش شاهد ۵ ساعته نشان داده شده است.

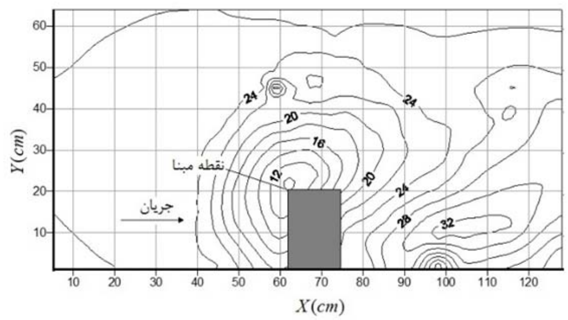
به‌منظور کاهش آبشستگی در این نقطه که به‌عنوان نقطهٔ مبنا معرفی گردید دو نوع طوقهٔ ال‌شکل و کامل با ابعاد مختلف که در جدول (۱) به آن اشاره گردید، مورد بررسی قرار گرفتند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

نتایج آزمایش‌های طوقهٔ ال‌شکل

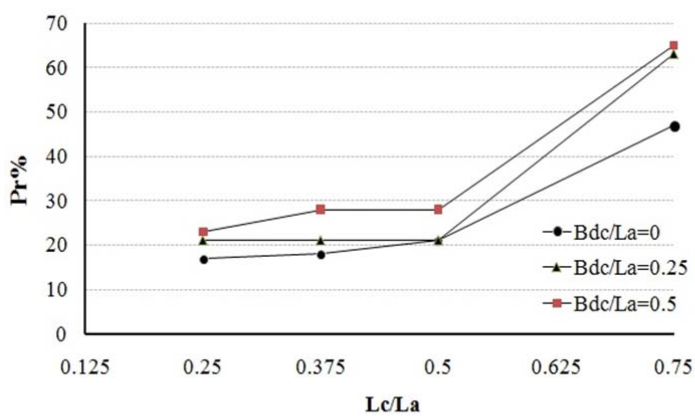
در تحقیق حاضر، ۱۲ طوقهٔ ال‌شکل مورد آزمایش قرار گرفت. این طوقه‌ها براساس پارامتر B_{dc} / L_a در سه گروه تقسیم‌بندی شدند. نتایج مربوط به این بخش از آزمایش‌ها، در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل٦ تغییر عمق آبشستگی در مقابل زمان بدون حضور طوقه



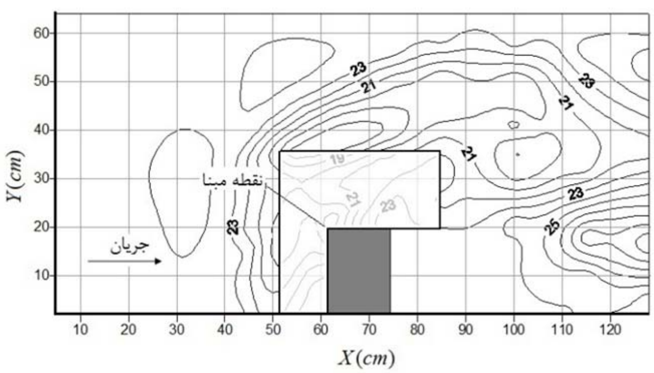
شکل ۷ الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون تکیه‌گاه در آزمایش شاهد ۵ ساعته



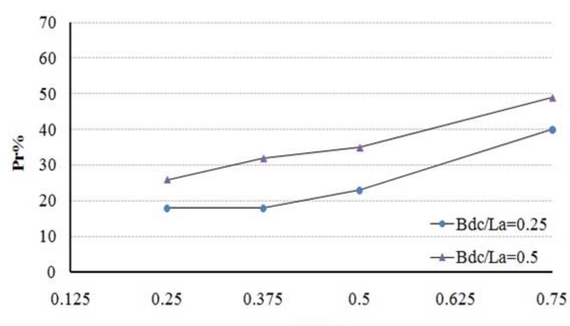
شکل ۸ کارایی طوقهٔ ال‌شکل در مقابل تغییر ابعاد آن

مطابق شکل(۸) با افزایش ابعاد طوقه در طول و در عرض پایین‌دست، عملکرد طوقه افزایش یافته است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد عملکرد هر سه گروه طوقهٔ ال‌شکل در برابر افزایش ابعاد طوقه، یکسان بوده است. افزایش پارامتر L_c / L_a از ۰/۲۵ به ۰/۵ تغییر محسوسی در میزان عملکرد طوقه (Pr) ایجاد نکرده است و عملکرد ۹ طوقه‌ای که دارای این ابعاد می‌باشند کمتر از ۳۰ درصد می‌باشد، اما با افزایش پارامتر مذکور از میزان ۰/۵ به ۰/۷۵، به شکل قابل توجهی، عملکرد طوقه بهبود یافته است به‌نحوی‌که طوقه دارای B_{dc} / L_a برابر صفر دارای عملکرد نزدیک به پنجاه و طوقه‌های دارای B_{dc} / L_a برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ عملکرد بالای ٦۰ درصد دارند. این نکته نشان می‌دهد که گرداب‌های اولیه در نزدیکی دیوارهٔ تکیه‌گاه قدرت بالایی ندارند که احتمالاً ناشی از تداخل لایهٔ مرزی تکیه‌گاه می‌باشد و حتی محافظت بستر به اندازهٔ نصف طول تکیه‌گاه (L_c / L_a برابر ۰/۵) نیز نتوانسته میزان آبشستگی را به شکل قابل قبولی کاهش دهد اما محافظت بستر با استفاده از طوقهٔ ال‌شکل در فاصلهٔ ۰/۵ تا ۰/۷۵ طول تکیه‌گاه، عملکرد طوقه را تقریباً ۳۰ درصد یعنی بیش از ۲ برابر افزایش داده است که حاکی از قدرت بالاتر گرداب‌های اولیه در این محدوده است. الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری برای یکی از طوقه‌های ال شکل که در شکل ۹ نشان داده شده است، درک بهتری از مکانیزم گرداب‌های پیرامون تکیه‌گاه را فراهم می‌سازد.

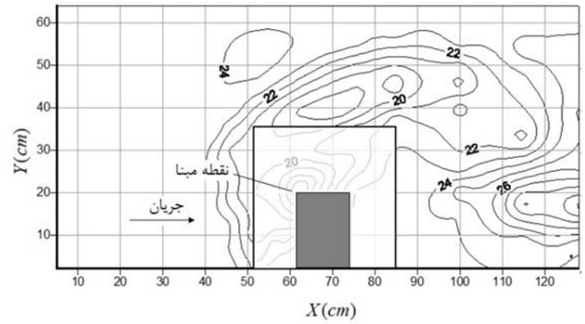
مطابق شکل (۹) رسوبات، داری توزیع یکنواخت‌تری نسبت به آزمایش شاهد شده‌اند، نصب طوقه ضمن کاهش عمق آبشستگی در نقطهٔ مبنا از ارتفاع رسوبات پشت تکیه‌گاه نیز کاسته است. به‌نحوی‌که بین گودترین و مرتفع‌ترین نقاط بستر کمتر از ۱۰ سانتی‌متر (۰/٦٦ برابر عمق جریان) اختلاف ارتفاع وجود دارد در حالی‌که این اختلاف در آزمایش شاهد ۵ ساعته به بیش از ۲۰ سانتی‌متر (۱/۳۳ برابر عمق جریان) می‌رسید. نکتهٔ دیگر اینکه تا فاصلهٔ قابل توجهی در پایین‌دست تکیه‌گاه تپه‌های رسوبی وجود ندارند و نهشته‌شدن تکیه‌گاه در فاصلهٔ حدود ۲ برابر عرض تکیه‌گاه رخ داده است. عدم تشکیل تپه‌های رسوبی در اطراف تکیه‌گاه در وضعیت نصب طوقه یکی از محاسن نصب طوقه می‌باشد چرا که توزیع نامناسب رسوبات و وجود تپه‌های رسوبی باعث انسداد جریان در بین پایه‌های پل شده که خود به نوعی مسبب آبشستگی به‌ویژه آبشستگی ناشی از تنگ-شدگی جریان می‌شود.



شکل ۹ الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون طوقهٔ ال شکل ($B_{dc}/L_a = 0.5$ و $L_c/L_a = 0.75$)



شکل ۱۰ کارایی طوقهٔ کامل در مقابل تغییر ابعاد آن



شکل ۱۱ الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون طوقهٔ کامل ($B_{dc} / L_a = 0.5$ و $L_c / L_a = 0.75$)

نتایج آزمایش‌های طوقهٔ کامل

در این بخش، دو گروه طوقـهٔ کامـل (B_{dc} / L_a برابـر ۰/۲۵ و ۰/۵) مورد بررسی قرار گرفت که نتـایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

در طوقه‌های کامل نیز با افزایش ابعاد طوقه، عملکرد آن بهبود یافته است. در طوقه‌های کامل نیز روند مشابه و یکسانی بین دو گروه دیده می‌شود. افزایش پارامتر بی‌بعد B_{dc} / L_a از ۰/۲۵ به ۰/۵ حدود ۱۰ درصد به عملکرد همهٔ طوقه‌ها افزوده است. در شکل (۱۱) الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون تکیه‌گاه مجهز به طوقه در حالت $B_{dc} / L_a = 0.5$ و $L_c / L_a = 0.75$ نشان داده شده است.

در حالت نصب طوقهٔ کامل نیز مشابه طوقـهٔ ال-شکل الگوی فرسـایش و رسـوب‌گـذاری مشـابهی رخ داده اسـت. نصـب طوقـه ضـمن کـاهش عمـق چالـهٔ آبشستگی از ارتفاع رسوبات نهشته شده در پایین‌دست تکیه‌گاه نیز کاسته است.

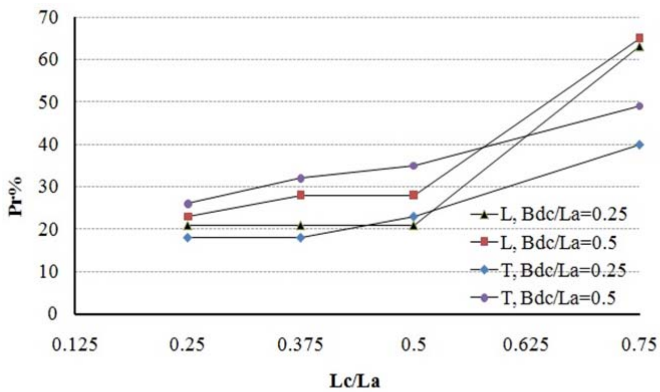
مقایسهٔ عملکرد طوقه‌های کامل و ال‌شکل

برای مقایسهٔ بهتر عملکرد دو نـوع طوقـهٔ کامـل و ال-شکل،شکل (۱۲) ترسیم شده است.

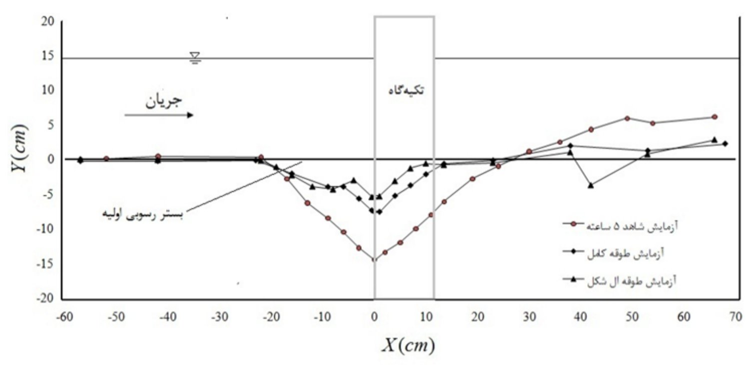
مطابق شکل در محدودهٔ L_c / L_a برابر ۰/۲۵ تا ۰/۵، عملکرد دو نوع طوقه از روند مشابهی تبعیت می-کنند و اختلاف معنی‌داری بین دو نوع طوقه دیده نمی-شود، اما با افزایش پارامتر مذکور از ۰/۵ به ۰/۷۵ عملکرد دو نوع طوقه متفاوت است، طوقه‌های ال‌شکل عملکرد بهتری در این محدوده از خود نشان می‌دهند و نسبت به طوقهٔ کامل بیش از ۱۰ درصد بر عملکرد آن افزوده شده است. بررسی مکانیزم جریان پیرامون تکیه-گاه در منابع نشان می‌دهد که در پایین‌دست تکیه‌گاه گرداب‌های برخاستگی فعال می‌باشند و این گرداب‌ها که از نوع افقی می‌باشند با دارا بودن مرکزی کم‌فشار برخلاف

گرداب‌های عمودی پتانسیل رسوب‌گذاری دارند. بنابراین به‌نظر می‌رسد طوقه‌ی کامل مانع از فعالیت بخشی از این گرداب شده در حالی‌که در طوقهٔ ال‌شکل نسبت به طوقهٔ کامل این گرداب قادر به فعالیت بیشتری است و بخشی از رسوباتی را که به درون چالهٔ آبشستگی ریزش می‌کنند تامین می‌کند و همین باعث کاهش عمق چالهٔ آبشستگی و درنتیجه افزایش عملکرد طوقه می‌شود. البته برای اثبات دقیق‌تر این فرضیه به آزمایش‌های متعددی در کنار بررسی الگوی سه‌بعدی

جریان پیرامون تکیه‌گاه در وضعیت نصب طوقه نیاز می‌باشد. در زمینهٔ تأثیر طوقه بر آبشستگی تکیه‌گاه تحقیقات بسیار اندکی انجام شده است که در بخش مقدمهٔ مقالهٔ حاضر به آن اشاره گردید. درخصوص این تحقیقات نیز فقط تاثیر ابعاد طوقه به‌صورت کلی و تراز نصب آن بر کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش ابعاد طوقه بر عملکرد آن می‌افزاید. در تحقیق خزیمه‌نژاد و قمشی [23] درخصوص مقایسه عملکرد طوقه‌های متقارن و نامتقارن نیز عرض پایین‌دست طوقه کمترین تأثیر را در کنترل آبشستگی دارد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. در شکل ۱۳ پروفیل طولی رسوبات پیرامون تکیه‌گاه در وضعیت با و بدون طوقه نشان داده شده است.



شکل ۱۲ مقایسهٔ عملکرد طوقه‌های کامل و ال‌شکل



شکل ۱۳ پروفیل طولی رسوبات بستر پیرامون تکیه‌گاه در آزمایش شاهد و آزمایش طوقه

($L_c / L_a = 0.75$ و $B_{dc} / L_a = 0.5$)

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر عملکرد دو نوع طوقهٔ کامل و ال‌شکل در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که در هر دو نوع طوقه، افزایش ابعاد طوقه، عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. در حالت نصب طوقه رسوبات پیرامون تکیه‌گاه توزیع یکنواختی دارند و اختلاف بین گودترین و مرتفع‌ترین نقاط بستر به بیش از دو برابر حالت بدون طوقه کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در محدودهٔ نزدیک تکیه‌گاه با توجه به عملکرد پایین دو نوع طوقه، قدرت گرداب‌های اولیه پایین است. محافظت بستر به‌وسیلهٔ طوقه تا حدود ۰/۵ برابر طول تکیه‌گاه نیز تأثیر قابل توجهی در کاهش عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه نداشت و عملکرد طوقه کمتر از ۳۰ درصد بود. افزایش طول بی‌بعد طوقه از ۰/۵ به ۰/۷۵ که برابر ۲۵ درصد طول تکیه‌گاه بود عملکرد طوقه را حدوداً ۲ برابر افزایش داد. بررسی طوقه‌های با ابعاد بزرگ‌تر نشان داد که در طوقه‌های کامل به‌دلیل این‌که بخش زیادی از محدودهٔ گرداب برخاستگی توسط طوقه کنترل می‌شود عملکرد آنها نسبت به طوقهٔ ال‌شکل کمتر می‌باشد و بنابراین در صورت استفاده از طوقه به‌عنوان سازهٔ کنترل آبشستگی تکیه‌گاه پل، به کاربردن طوقهٔ ال‌شکل با توجه به این‌که دارای مساحت کمتری نیز می‌باشد، به‌صرفه‌تر خواهد بود.

مراجع

۱.خادمی، خیراله.، «بررسی اثر فواصل طولی و عرضی صفحات مستغرق بر آبشستگی موضعی ایجاد شده در محل تکیه‌گاه پل»، رسالهٔ دکتری، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۹۱).

۲. خادمی، خیراله.، خزیمه‌نژاد، حسین.، شفاعی‌بجستان، محمود.،«برداشت بی‌رویهٔ مصالح رودخانه‌ای در استان خوزستان یکی از عوامل اصلی آبشستگی پای پل‌های بزرگ»، سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۹).

3. Melville, B.W.," Local Scour at Bridge Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 4, PP. 615-631. (1992)

4. Wong, W. H., "Scour at Bridge Abutments", Report No. 275, Dept. of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand., (1982).

5. Tey, C. B.," Local scour at bridge abutments", Report No. 329, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag,Auckland, New Zealand., (1984).

6. Kwan, F., "Study of Abutment Scour", Report No. 451, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand, (1988).

7. Kandasamy, J. K., "Abutment scour", Report No. 458, School of Engineering., University of Auckland, Auckland, New Zealand, (1989).

8. Dongol, D. M. S.,. "Local scour at bridge abutments", Report No. 544, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand , (1994).

9. Liu, M. K., Chang, F. M., and Skinner, M. M.," Effect of bridge construction on scour and backwater", Report No. CER60-HKL22, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, (1961).

10. Gill, M. A.," Bed erosion around obstructions in rivers", Ph.D thesis, The University of London, Imperial College of Science and Technology, (1970).

11. Chiew, Y. M.," Scour protection at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE,No.118(9), pp.1260-1269, (1992).

12. Kumar, V., Ranga Raju, K. G., and Vittal, N.," Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars". *Journal of Hydraulic Engineering*, No. 125(12), pp. 1302-1305., (1999)

13. Singh, C.P., Setia, B. and Verma, D.V.S., "Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier", Proceedings of Theme D, 29th Congress on Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery, Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing, China., No. 16-21., pp. 202-209., (2001).

14. Monocad, M, A, T., Aguirre-Pe J., Bolivar J.C and Flores E.J.," Scour protection of circular ridge piers with collars and slots". *Journal of Hydraulic Research*, vol. 47, No. 1, pp. 119-126., (2009).

۱۵.بلوچی، محمد.، چمنی، محمدرضا.، بیرامی، محمدکریم.، «بررسی اثر تغییر شکل طوق بر روند و میزان آبشستگی موضعی»، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک، ایران، دانشگاه شهرکرد،(١٣٨٦).

16. Zarrati A.R., Gholami H and Mashahir M.B., "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers". *Journal of Hydraulic Research*. vol. 42, No. 1, pp. 97-103., (2004).

17. Zarrati, A. R., Nazariah, M and Mashahir, M. B., "Reduction of local scour in the vicinity of bridge piergroups using collars and riprap". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 132, No. 2, pp. 154-162., (2006).

۱۸.ثانی‌خانی، هادی.، حسین‌زاده دلیر، علی.، فرسادی زاده، داوود.، «عملکرد طوق‌های مربعی شکل کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل»، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران،(۱۳۸۷).

۱۹.شریعتی، حسین.، خداشناس، سعیدرضا.، اسماعیلی، کاظم.، «مقایسه عملکرد طوق مربعی و دایره‌ای در آبشستگی موضعی در پایه پل»، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانهدانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۸).

20. Kayaturk, S.Y., " Scour and scour protection at bridge abutment". Ph.D thesis, Middle East Technical University, (2005).

21. Li, H., Kuhnle, R.A and Barkdoll, B.D ," Countermeasures Against Scour At Abutments". Report No. 49, USDA, Agricultural Research Service, (2006).

22. Khozeymehnezhad H., Ghomshi M., Shafai-bejestan M., "Investigation of Collar in different sizes and bed level as a Bridge Abutment Scour Countermeasure", Ecology environmental & conservation, vol. 18, No. 4, pp. 963-966., (2012).

23. Khozeymehnezhad,H., Ghomshi,M., "Comparison of symmetrical and unsymmetrical rectangular collars on scour reduction of bridge abutment", *Middle east journal of scientific research*, vol. 18, No. 8, pp. 1099-1104., (2013).

24. Raudkivi, A., Ettema, R.," Clear-water scour at cylindrical piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 109, No. 3, pp. 338-350., (1983).